

УДК 621.316.925

М. Й. Бурбело, д. т. н., проф.; С. М. Мельничук; О. О. Ємельянов

## ЗАСТОСУВАННЯ НАПРАВЛЕНОГО СТРУМОВОГО ЗАХИСТУ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ НЕПОВНОФАЗНИХ НАВАНТАЖУВАЛЬНИХ РЕЖИМІВ У МЕРЕЖАХ З ЕФЕКТИВНО ЗАЗЕМЛЕНОЮ НЕЙТРАЛЛЮ

*У статті проаналізовано величини, напрямки та співвідношення умовної потужності нульової та зворотної послідовності в режимах поздовжньої несиметрії. Доведено можливість застосування цих величин для захисту мереж з ефективно заземленою нейтраллю. Запропоновано для захисту від неповнофазних режимів використовувати направлений захист умовної потужності зворотної послідовності, який працює за фактом знаходження аргументу цих потужностей у заданих секторах комплексної площини.*

**Ключові слова:** неповнофазні режими, релейний захист, умовна потужність зворотної послідовності, пульсувальна потужність.

### Розгляд проблеми

Згідно з вимогами п. 3.2.106 ПУЕ [1] для ліній 110 кВ у мережах з ефективно заземленою нейтраллю повинні бути передбачені пристрої релейного захисту (РЗ) від міжфазних замикань та від замикань на землю. Захист від режимів поздовжньої несиметрії на таких лініях нормативними документами не передбачено. У разі виникнення неповнофазних режимів можлива неправильна, зайва робота пристроїв РЗ суміжних елементів електромережі та порушення в роботі електрообладнання споживачів – двигунів і трансформаторів.

Під час розробки пристроїв РЗ широке застосування отримав метод симетричних складників [2], одним з основних постулатів якого є твердження про те, що місце виникнення несиметричного пошкодження є джерелом потужностей нульової та зворотної послідовностей. За наявності достатнього струму факт виникнення неповнофазного режиму добре виявляється струмовим направленим захистом нульової послідовності (СЗНП). На підстанції, від якої відходять декілька ліній, пошкоджену можна виявити за напрямком вектора  $I_0$  відносно  $U_0$ : потужність  $S_0$  на пошкодженій ПЛ буде направлена від лінії до шин ПС, а на інших, непошкоджених ПЛ, навпаки, буде розтікатися від шин ПС у лінії. Такий захист при КЗ із замиканням на «землю» однаково ефективно працює як у радіальних, так і в замкнутих кільцевих мережах. За величиною струму  $I_0$  можна знайти відстань до місця КЗ і визначити, де сталася аварія: на своїй ПЛ чи на лініях, що відходять від суміжної ПС. У разі виникнення неповнофазного режиму за достатніх величин струмів можна виявити, з боку якої ПЛ, що відходять від шин ПС, сталася аварія. Але застосування СЗНП у багатьох випадках характеризується недостатньо високою чутливістю.

У пристроях РЗ фірми Schneider Electric для виявлення обриву проводу на лінії запропоновано використовувати співвідношення  $I_2/I_1$ . Аналогічний алгоритм використовує фірма General Electric. Використовуючи такий метод, під час виникнення обриву на одній з двох паралельних ліній можна відрізнити, яка з них пошкоджена, а яка – справна. Значення  $I_2$  на обох лініях будуть однакові, але  $I_1$  на пошкодженій буде менше, ніж на справній. Відповідно співвідношення  $I_2/I_1$  для пошкодженої лінії буде більшим, ніж для справної.

Але застосування такого підходу для прохідних (транзитних) підстанцій з малим власним

споживанням є досить проблематичним, тому що співвідношення  $I_2/I_1$  на обох лініях – і пошкодженій, і справній – будуть дуже близькі за значенням, що не дає можливості для селективної роботи захисту [3].

### Обґрунтування результатів

Проаналізуємо можливість виявлення неповнофазного навантажувального режиму на прикладі розподільної кільцевої мережі 110 кВ (рис. 1). Обмежимося аналізом потужностей нульової послідовності  $\underline{S}_0 = 3\dot{U}_0 \dot{I}_0$ , умовної потужності нульової послідовності  $\underline{S}_{10} = 3\dot{U}_1 \dot{I}_0$ , які передаються по лініях, та умовної потужності нульової послідовності трансформаторів  $\underline{S}_{10T} = 3\dot{U}_1 \dot{I}_{0T}$ . Використання потужностей забезпечить можливість порівняльного аналізу.

У табл. 1 наведено результати розрахунку кільцевої мережі у разі обриву фази А Л-3. Для наочності напівжирним шрифтом виділено дані, що стосуються пошкодженої лінії. Розрахунок виконано методом симетричних складників із використанням таких даних: потужність системи  $S_c = 1000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$  ( $X_{c1} = X_{c2} = 13,2 \text{ Ом}$ ,  $X_{c0} = 1,4X_{c1} = 18,5 \text{ Ом}$ ); погонні опори ліній прямої, зворотної та нульової послідовностей  $Z_{\text{пог.1}} = Z_{\text{пог.2}} = 0,125 + j0,41 \text{ Ом/км.}$ ;  $Z_{\text{пог.0}} = 0,274 + j1,38 \text{ Ом/км.}$ ; потужність трансформаторів  $S_{\text{нт}} = 16 \text{ МВ} \cdot \text{А}$  ( $u_k^* = 0,105$ ); потужність навантажень  $S_{\text{н1}} = 10 \text{ МВ} \cdot \text{А}$  ( $\cos \varphi_{\text{н}} = 0,866$ ),  $S_{\text{н2}} = 5$  або  $10 \text{ МВ} \cdot \text{А}$  ( $\cos \varphi_{\text{н}} = 0,866$ ).

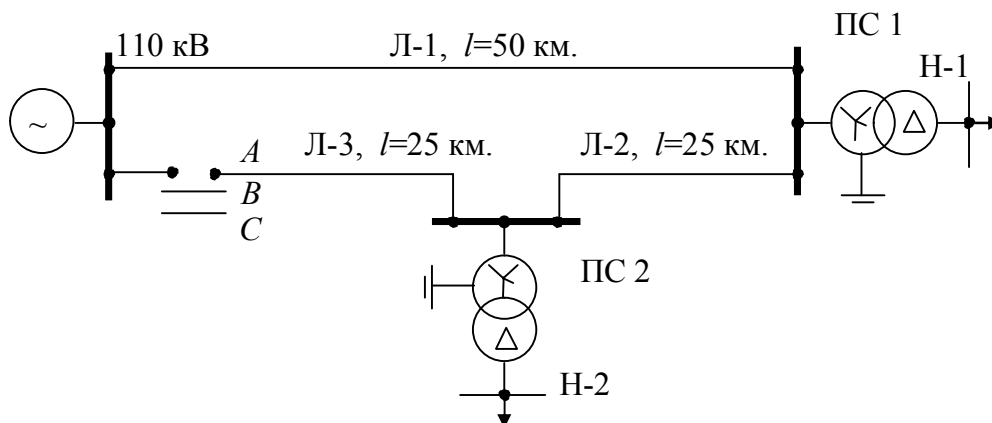


Рис. 1. Розрахункова схема кільцевої мережі

Таблиця 1

Результати розрахунків неповнофазного режиму у разі обриву фази А лінії Л-3

Підстанція, лінія	Навантаження	$\underline{S}$ , МВ·А	$\underline{S}_0$ , кВ·А	$\underline{S}_{10}$ , МВ·А	$\underline{S}_{10T}$ , МВ·А
ПС-1, Л-1	$S_{\text{н2}} = S_{\text{н1}}$	12,2 $\angle$ 28°	3,7 $\angle$ -101°	0,8 $\angle$ 28°	-0,7 $\angle$ 39°
	$S_{\text{н2}} = 0,5S_{\text{н1}}$	9,6 $\angle$ 29°	1,8 $\angle$ -101°	0,6 $\angle$ 28°	-0,5 $\angle$ 39°
ПС-1, Л-2 (Л-3)	$S_{\text{н2}} = S_{\text{н1}}$	-2,3 $\angle$ 26°	<b>6,7 <math>\angle</math> 84°</b>	<b>-1,5 <math>\angle</math> 33°</b>	<b>-0,7 <math>\angle</math> 39°</b>
	$S_{\text{н2}} = 0,5S_{\text{н1}}$	0,3 $\angle$ 48°	<b>3,3 <math>\angle</math> 84°</b>	<b>-1,0 <math>\angle</math> 33°</b>	<b>-0,5 <math>\angle</math> 39°</b>
ПС-2, Л-2 (Л-1)	$S_{\text{н2}} = S_{\text{н1}}$	2,3 $\angle$ 26°	0,9 $\angle$ -58°	1,5 $\angle$ 33°	-1,3 $\angle$ 41°
	$S_{\text{н2}} = 0,5S_{\text{н1}}$	-0,3 $\angle$ 48°	0,4 $\angle$ -58°	1,0 $\angle$ 33°	-0,9 $\angle$ 41°
ПС-2, Л-3	$S_{\text{н2}} = S_{\text{н1}}$	7,5 $\angle$ 30°	<b>1,6 <math>\angle</math> 126°</b>	<b>-2,7 <math>\angle</math> 37°</b>	<b>-1,3 <math>\angle</math> 41°</b>
	$S_{\text{н2}} = 0,5S_{\text{н1}}$	5,3 $\angle$ 30°	<b>0,8 <math>\angle</math> 126°</b>	<b>-1,9 <math>\angle</math> 37°</b>	<b>-0,9 <math>\angle</math> 41°</b>

Із наведеної таблиці випливає, що обрив фази Л-3 можна виявити за аргументом потужності  $\underline{S}_0$ , застосування якої забезпечує можливість селективної роботи захисту в кільцевій мережі. Зважаючи на те, що аргумент потужності  $\underline{S}_0$  змінюється у фіксованих секторах відповідно від 84 до 126 ел. градусів та від -101 до -58 ел. градусів, які відповідають пошкодженій і непошкодженій лініям, і ці сектори залишаються такими ж у разі пошкодження будь-якої з фаз, за значенням аргументу можна виявити пошкоджену лінію й забезпечити селективність вимикання пошкодженої лінії, побудувавши прямо залежну характеристику часу вимикання від аргументу цієї потужності. Аргумент цієї потужності більший на Л-2 ПС-1, ніж на Л-3 ПС-2, яка є пошкодженою. Ця властивість є стабільною за різних співвідношень потужностей. Однак чутливість є недостатньо високою ( $\underline{S}_0=800 \text{ В}\cdot\text{А}$  при  $\underline{S}=5,3 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ ).

Обрив фази можна також виявити за аргументом потужності  $\underline{S}_{10}$  (кутом зсуву фаз струмів  $\dot{I}_0$  відносно напруги  $\dot{U}_1$ ), оскільки напрямок цієї величини для пошкодженої лінії кільцевої мережі змінюється на протилежний відносно напрямку потужності  $\underline{S}$ . Зважаючи на те, що аргумент потужності  $\underline{S}_{10}$  перебуває у фіксованих секторах, які відповідають пошкодженій і непошкодженій лініям, і модуль цієї потужності більший на Л-3 ПС-2, ніж на Л-2 ПС-1, за використання потужності  $\underline{S}_{10}$  або струму  $\dot{I}_0$  можна забезпечити селективне вимкнення пошкодженої лінії Л-3.

Для забезпечення селективної роботи захисту за потужністю  $\underline{S}_{10}$  або струмом  $\dot{I}_0$  повинна бути передбачена обернено залежна характеристика часу спрацювання від модуля цих величин. Сектор, який визначають аргументом  $\underline{S}_{10}$ ,  $\dot{I}_0$ , що відповідає пошкодженій і непошкодженій фазам, змінюється на 120 ел. градусів залежно від того, яка саме фаза є пошкодженою. Але оскільки ці сектори є значно вужчими, ніж для потужності  $\underline{S}_0$ , то реалізація такого захисту в мікропроцесорному виконанні можлива. При цьому чутливість захисту з використанням  $\underline{S}_{10}$  зростає порівняно з тим, якщо інформативною є потужність  $\underline{S}_0$  ( $\underline{S}_{10}=1,9 \text{ МВ}\cdot\text{А}$  при  $\underline{S}=5,3 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ ).

Додатковою умовою, яка може бути використана для визначення пошкодженої лінії є напрямок потужності  $\underline{S}_{10T}$  на цій підстанції. Якщо  $\underline{S}_{10T}$  розташований в тому ж секторі, що і  $\underline{S}_{10}$  контрольованої лінії, то лінія пошкоджена. Ця умова є необхідною для ліній, на яких відбувається зміна напрямку передавання потужності

Таблиця 2

Результати розрахунків неповнофазного режиму в разі обриву фази А лінії Л-2

Підстанція, лінія	Навантаження	$\underline{S}$ , МВ·А	$\underline{S}_0$ , кВ·А	$\underline{S}_{10}$ , МВ·А	$\underline{S}_{10T}$ , МВ·А
ПС-1, Л-1	$S_{H2} = S_{H1}$	8,4 $\angle$ 29°	0,3 $\angle$ -101°	0,3 $\angle$ 32°	-0,2 $\angle$ 43°
	$S_{H2} = 0,5S_{H1}$	7,7 $\angle$ 29°	0,8 $\angle$ -101°	0,4 $\angle$ 32°	-0,3 $\angle$ 43°
ПС-1, Л-2 (Л-3)	$S_{H2} = S_{H1}$	1,5 $\angle$ 30°	<b>0,6 <math>\angle</math> 84°</b>	<b>-0,4 <math>\angle</math> 37°</b>	<b>-0,2 <math>\angle</math> 43°</b>
	$S_{H2} = 0,5S_{H1}$	2,2 $\angle$ 30°	<b>1,3 <math>\angle</math> 84°</b>	<b>-0,7 <math>\angle</math> 37°</b>	<b>-0,3 <math>\angle</math> 43°</b>
ПС-2, Л-2 (Л-1)	$S_{H2} = S_{H1}$	-1,5 $\angle$ 31°	<b>0,4 <math>\angle</math> 82°</b>	<b>0,4 <math>\angle</math> 37°</b>	<b>0,1 <math>\angle</math> 44°</b>
	$S_{H2} = 0,5S_{H1}$	-2,2 $\angle$ 31°	<b>0,8 <math>\angle</math> 82°</b>	<b>0,7 <math>\angle</math> 36°</b>	<b>0,2 <math>\angle</math> 44°</b>
ПС-2, Л-3	$S_{H2} = S_{H1}$	11,4 $\angle$ 30°	0,3 $\angle$ -101°	-0,3 $\angle$ 33°	0,1 $\angle$ 44°
	$S_{H2} = 0,5S_{H1}$	7,2 $\angle$ 30°	0,6 $\angle$ -101°	-0,5 $\angle$ 33°	0,2 $\angle$ 44°

У табл. 2 наведено результати розрахунків неповнофазного режиму в разі обриву фази А

лінії Л-2, з якої видно, що однаковість розміщення векторів  $\underline{S}_{10}$  контрольованої лінії та  $\underline{S}_{10T}$  трансформатора ПС є основним критерієм виявлення обриву провода для ліній з реверсуванням напрямку передавання потужності.

Водночас, якщо нейтраль трансформатора на ПС-1 або ПС-2 розземлена, то застосування величин нульової послідовності для селективного вимкнення пошкодженої лінії неможливе. Зазначена особливість вимагає врахування цього фактора під час вибору підстанцій із розземленими нейтралями трансформаторів.

### Висновки

Проаналізовано величини, напрямки та співвідношення потужності нульової послідовності, умовних потужностей нульової та зворотної послідовностей у режимах поздовжньої несиметрії.

Для захисту від неповнофазних режимів ліній живлення з одностороннім напрямком передавання потужності запропоновано використовувати направлений захист умовної потужності нульової послідовності (струму нульової послідовності), який працює за фактом знаходження аргумента цієї потужності (струму) в заданих секторах комплексної площини.

Для ліній живлення з двостороннім напрямком передавання потужності в якості критерію обриву провода однієї фази лінії кільцевої мережі запропоновано однаковість розміщення векторів  $\underline{S}_{10}$  контрольованої лінії та  $\underline{S}_{10T}$  трансформатора ПС.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Правила улаштування електроустановок. – Харків : Вид-во «Форт», 2011. – 736 с.
2. Вагнер К. Ф. Метод симметричных составляющих / К. Ф. Вагнер, Р. Д. Эванс. – ОНТИ НКТП СССР, 1936. – 407 с.
3. Нагай В. И. Релейная защита ответственных подстанций электрических сетей / Нагай В. И. – М. : Энергоатомиздат, 2002. – 312 с.

**Бурбело Михайло Йосипович** – д. т. н., професор кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту.

Вінницький національний технічний університет.

**Мельничук Сергій Миколайович** – інженер Південно-Західної електроенергетичної системи ДП НЕК „Укренерго”.

Південно-Західна електроенергетична система ДП НЕК „Укренерго”.

**Ємельянов Олексій Олександрович** – студент інституту електроенергетики та електромеханіки.

Вінницький національний технічний університет.

**M. I. Burbelo, Dr. Sc. (Eng.), Prof.; S. M. Melnytchyk; O. O. Emelianov**

## **APPLICATION OF DIRECTIONAL CURRENT PROTECTION FOR DETECTION OPEN PHASE LOADING MODES IN THE GRIDS WITH EFFICIENTLY GROUNDED NEUTRAL**

*The paper analyzes the values, directions and relations of conventional power of zero and negative sequence in longitudinal asymmetry modes. The possibility of such values application for protection of grids with efficiently grounded neutral is proved.*

*For the protection against open-phase modes the directed protection of conventional power of negative sequence, operating after determining the argument of these powers in  $p$ -reset sectors of complex plane is suggested to use.*

**Key words:** open-phase modes, relay protection, conventional power of negative sequence, pulsating power.

### **Problem statement**

In accordance with the requirements of Clause. 3.2.106 of Rules of Arrangement of Electrical Installations [1] for lines of 110 kV in the grids with efficiently grounded neutral relay protection (RP) devices against interphase short circuit and earth shortings must be provided. Protection against the modes of longitudinal asymmetry on such lines is not provided by normative documents. In case of open-phase modes arising faulty, redundant operation of relay protection devices of adjacent elements of electric grid and disturbances in the functioning of electric equipment – motors and transformers is possible.

In the process of development of relay protection (RP) devices the method of symmetrical components [2] found wide application, one of the principle postulates of this method is the statement that the place of asymmetric fault rise is the source of powers of zero and negative sequences. If sufficient current is available, the fact of open-phase mode occurrence is determined by current directional protection of zero sequence (CPZS). At the substation, from which several lines leave, the faulty line can be detected by the direction of vector  $\underline{I}_0$  relatively  $\underline{U}_0$  :– power  $\underline{S}_0$  at the damaged overhead transmission line (OL) will be directed from the line to the bus of substation, and at others, non damaged OL, vice versa, it will spread from the buses of substation in the lines. Such protection in case of short circuit with short circuiting on the ground operates also efficiently, both in radial and in closed circular grids. By the value of the current  $\underline{I}_0$  the distance to the place of short circuit can be found and determine where the failure occurred: at own OL or at the lines, which leave the adjacent substation. If open-phase mode occurs at sufficient values of current we can detect on the side of which OL that leaves the buses of substation the failure took place. However, application of CPZS in many cases is characterized by insufficiently high sensitivity.

In relay protection devices, manufactured by the company Schneider Electric for detection of wire break on the line the relation  $I_2 / I_1$  is suggested to use. Similar algorithm is applied by the company General Electric. Using such method when the break took place at one of two parallel lines, we can determine which line is damaged and which one is operational. Value of  $I_2$  at both lines will be the same, but  $I_1$  at the damaged line will be less than at operational line. Correspondingly, relation  $I_2 / I_1$  for the damaged line will be greater than for operational line.

But application of such an approach for transit substations with small own demand is rather problematic, because the  $I_2 / I_1$  relation at both lines – damaged and operational – will be very close by value and this will not provide the possibility for selective operation of the protection [3].

### Substantiation of the results

We will analyze the possibility of detection of open-phase loading mode on the example of distributed circular grid 110 kV (Fig. 1). We will perform only the analysis of powers of zero sequence  $\underline{S}_0 = 3\dot{U}_0 \dot{I}_0^*$ , conventional power of zero sequence  $\underline{S}_{10} = 3\dot{U}_1 \dot{I}_0^*$  which are transmitted by lines, and conventional power of zero sequence of the transformers  $\underline{S}_{10T} = 3\dot{U}_1 \dot{I}_{0T}^*$ . Usage of the powers will provide the possibility to perform the comparative analysis.

Table 1 contains the results of circular network calculation in case of phase *A* L-3 break. For convenience, data, regarding the broken line are marked with half-bold type. The calculation is performed applying the method of symmetrical components, using the following data: power of the system  $S_s = 1000 \text{ MW} \cdot \text{A}$  ( $X_{s1} = X_{s2} = 13.2 \text{ Ohm}$ ,  $X_{s0} = 1.4X_{s1} = 18.5 \text{ Ohm}$ ); linear resistances supports of the lines of direct, reverse and zero sequences  $Z_{lin,1} = Z_{lin,2} = 0.125 + j0.41 \text{ Ohm/km}$ ;  $Z_{lin,0} = 0.274 + j1.38 \text{ Ohm/km}$ ; power of the transformers  $S_{NT} = 16 \text{ MW} \cdot \text{A}$  ( $u_{sh}^* = 0.105$ ); power of loads  $S_{l1} = 10 \text{ MB} \cdot \text{A}$  ( $\cos \varphi_l = 0.866$ ),  $S_{l2} = 5 \text{ or } 10 \text{ MW} \cdot \text{A}$  ( $\cos \varphi_l = 0.866$ ).

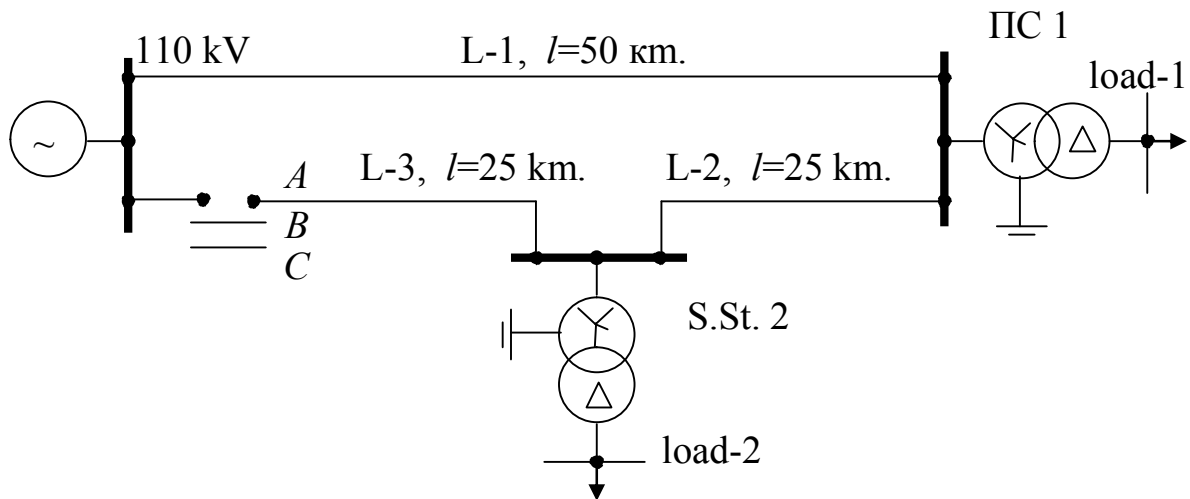


Fig. 1. Calculation scheme of circular grid

Table 1

Results of open-phase mode in case of *A* phase break of line L-3

Substation, line	Load	$\underline{S}$ , MW·A	$\underline{S}_0$ , kV·A	$\underline{S}_{10}$ , MW·A	$\underline{S}_{10T}$ , MW·A
S.St-1, L-1	$S_{l2} = S_{l1}$	$12.2 \angle 28^\circ$	$3.7 \angle -101^\circ$	$0.8 \angle 28^\circ$	$-0.7 \angle 39^\circ$
	$S_{l2} = 0.5S_{l1}$	$9.6 \angle 29^\circ$	$1.8 \angle -101^\circ$	$0.6 \angle 28^\circ$	$-0.5 \angle 39^\circ$
S.St.-1, L-2 (L-3)	$S_{l2} = S_{l1}$	$-2.3 \angle 26^\circ$	<b><math>6.7 \angle 84^\circ</math></b>	<b><math>-1.5 \angle 33^\circ</math></b>	<b><math>-0.7 \angle 39^\circ</math></b>
	$S_{l2} = 0.5S_{l1}$	$0.3 \angle 48^\circ$	<b><math>3.3 \angle 84^\circ</math></b>	<b><math>-1.0 \angle 33^\circ</math></b>	<b><math>-0.5 \angle 39^\circ</math></b>
S.St.-2, L-2 (L-1)	$S_{l2} = S_{l1}$	$2.3 \angle 26^\circ$	$0.9 \angle -58^\circ$	$1.5 \angle 33^\circ$	$-1.3 \angle 41^\circ$
	$S_{l2} = 0.5S_{l1}$	$-0.3 \angle 48^\circ$	$0.4 \angle -58^\circ$	$1.0 \angle 33^\circ$	$-0.9 \angle 41^\circ$
S.St.-2, L-3	$S_{l2} = S_{l1}$	$7.5 \angle 30^\circ$	<b><math>1.6 \angle 126^\circ</math></b>	<b><math>-2.7 \angle 37^\circ</math></b>	<b><math>-1.3 \angle 41^\circ</math></b>
	$S_{l2} = 0.5S_{l1}$	$5.3 \angle 30^\circ$	<b><math>0.8 \angle 126^\circ</math></b>	<b><math>-1.9 \angle 37^\circ</math></b>	<b><math>-0.9 \angle 41^\circ</math></b>

From the given table it follows, that phase L-3 break can be detected by the argument of power

$\underline{S}_0$ , application of which provides the possibility of selective operation of protection in circular grid. Taking into account the fact, that power argument  $\underline{S}_0$  varies in fixed sectors from 84 to 126 electrical degree and from -101 to -58 electrical degrees, that correspond to damaged and non-damaged lines and these sectors remain the same in case of damage of any phase, the damaged line can be detected by the value of argument and provide the selectivity of damaged line switching can be provided, having built directly dependent characteristic of switching time on the argument of this power. Argument of this power is greater at L-2, S.St.-1 than at L-3 S.St.-2, which is damaged. This characteristic is stable at different relations of powers. However, sensitivity will not be sufficiently high ( $\underline{S}_0=800 \text{ V}\cdot\text{A}$  at  $\underline{S}=5.3 \text{ MV}\cdot\text{A}$ ).

Break of the phase can be detected by power argument  $\underline{S}_{10}$  (angle of current  $\dot{I}_0$  phase shift relatively voltage  $\dot{U}_1$ ) as the direction of this value for damaged line of circular grid changes into opposite relatively power  $\underline{S}$  direction. Taking into consideration that power argument  $\underline{S}_{10}$  is in fixed sectors, corresponding to damaged and non-damaged lines of this power more than at L-3 S.St.-2 than at L-2 S.St.-1, using power  $\underline{S}_{10}$  or current  $\dot{I}_0$  selective disconnection of damaged line L-3 can be provided.

To provide selective operation of the protection by the power  $\underline{S}_{10}$  or current  $\dot{I}_0$  reverse dependent characteristic of operation time on the modulus of these values must be provided. Sector, determined by the argument  $\underline{S}_{10}$ ,  $\dot{I}_0$ , that corresponds to damaged and non-damaged phases, changes into 120 electric degrees depending on the fact, what phase is damaged. But as these sectors are much more narrower, than for  $\underline{S}_0$  power, then realization of such protection by means of microprocessor is possible. Sensitivity of the protection using  $\underline{S}_{10}$  increases, as compared with the fact that informative is power  $\underline{S}_0$  ( $\underline{S}_{10}=1.9 \text{ MV}\cdot\text{A}$  at  $\underline{S}=5.3 \text{ MV}\cdot\text{A}$ ).

Additional condition that can be used for detection of the damaged line, is the direction of power  $\underline{S}_{10T}$  at the given substation. If  $\underline{S}_{10T}$  is within the same sector that  $\underline{S}_{10}$  of the controlled line, then the line is damaged. The given condition is necessary for the lines, where the change of power transmission direction takes place.

Table 2 contains the results of open-phase mode calculations in case of phase *A* of line L-2 break, it is seen from the Table that uniformity of vectors  $\underline{S}_{10}$  of the controlled line and  $\underline{S}_{10T}$  of S.St. transformer is main criterion of wire break detection for lines with the reverse of power transmission direction.

Table 2

Results of open -phase mode calculations in case of phase *A* of line L-2 break

Substation, line	Load	$\underline{S}$ , MV·A	$\underline{S}_0$ , кV·A	$\underline{S}_{10}$ , MW·A	$\underline{S}_{10T}$ , MV·A
S.St.-1, L-1	$S_{l2} = S_{l1}$	$8.4 \angle 29^\circ$	$0.3 \angle -101^\circ$	$0.3 \angle 32^\circ$	$-0.2 \angle 43^\circ$
	$S_{l2} = 0.5S_{l1}$	$7.7 \angle 29^\circ$	$0.8 \angle -101^\circ$	$0.4 \angle 32^\circ$	$-0.3 \angle 43^\circ$
S.St.-1, L-2 (L-3)	$S_{l2} = S_{l1}$	$1.5 \angle 30^\circ$	<b><math>0.6 \angle 84^\circ</math></b>	<b><math>-0.4 \angle 37^\circ</math></b>	<b><math>-0.2 \angle 43^\circ</math></b>
	$S_{l2} = 0.5S_{l1}$	$2.2 \angle 30^\circ$	<b><math>1.3 \angle 84^\circ</math></b>	<b><math>-0.7 \angle 37^\circ</math></b>	<b><math>-0.3 \angle 43^\circ</math></b>
S.St.-2, L-2 (L-1)	$S_{l2} = S_{l1}$	$-1.5 \angle 31^\circ$	<b><math>0.4 \angle 82^\circ</math></b>	<b><math>0.4 \angle 37^\circ</math></b>	<b><math>0.1 \angle 44^\circ</math></b>
	$S_{l2} = 0.5S_{l1}$	$-2.2 \angle 31^\circ$	<b><math>0.8 \angle 82^\circ</math></b>	<b><math>0.7 \angle 36^\circ</math></b>	<b><math>0.2 \angle 44^\circ</math></b>
S.St.-2, L-3	$S_{l2} = S_{l1}$	$11.4 \angle 30^\circ$	$0.3 \angle -101^\circ$	$-0.3 \angle 33^\circ$	$0.1 \angle 44^\circ$
	$S_{l2} = 0.5S_{l1}$	$7.2 \angle 30^\circ$	$0.6 \angle -101^\circ$	$-0.5 \angle 33^\circ$	$0.2 \angle 44^\circ$

As the same time, if the neutral of the transformer at S.St.-1 or S.St.-2 is disconnected from the earth, then the application of zero sequence values for selective disconnection of the damaged line is impossible. The above-mentioned characteristic requires taking into account of this factor while choosing substations with transformers neutrals, disconnected from the earth.

### Conclusions

Values, directions and relations of power, zero sequence, conventional powers of zero and reverse sequences in longitudinal asymmetry modes are analyzed.

For protection against open-phase modes of supply lines with one-way direction of power transmission the directed protection of conventional power of zero sequence (current of zero sequence) is suggested to be used, the given protection operates on the fact of detection of this power (current) argument in preset sectors of complex plane.

For supply lines with two-way direction of power transfer the uniformity of location of vectors  $\underline{S}_{10}$  of controlled line and  $\underline{S}_{10T}$  of S.St. transformer is suggested as the criterion of wire break of one phase of circular grid line.

### REFERENCES

1. Правила улаштування електроустановок. – Харків : Вид-во «Форт», 2011. – 736 с.
2. Вагнер К. Ф. Метод симметричных составляющих / К. Ф. Вагнер, Р. Д. Эванс. – ОНТИ НКТП СССР, 1936. – 407 с.
3. Нагай В. И. Релейная защита ответственных подстанций электрических сетей / Нагай В. И. – М. : Энергоатомиздат, 2002. – 312 с.

**Burbelo Mykhailo** – Dr. Sc. (Eng.), Professor with the Department of Electrical Engineering Systems of Energy Supply and Energy Management.  
Vinnytsia National Technical University.

**Melnytskyk Sergiy** – Engineer, South-West Electric Energy System of State Enterprise NEC «Ukrenergo».  
South-West Electric Energy System of State Enterprise of «NEC «Ukrenergo».

**Emelianov Olexiy** – Student, Institute of Electrical Power Engineering and Electromechanics.  
Vinnytsia National Technical University.